

ГОМЕЛЬСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ИМ. П.О. СУХОГО

---

УДК 621.527.2: 681.587.34

**ПОГУЛЯЕВ МИХАИЛ НИКИФОРОВИЧ**

**ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ  
ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ВИБРАТОРОВ**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы,  
включая их управление и регулирование

Автореферат диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук

Гомель 1998

Работа выполнена на кафедре “Автоматизированный электропривод” Гомельского политехнического института  
им. П.О. Сухого

Научный руководитель – доктор технических наук,  
профессор Луковников  
В.И.

Официальные оппоненты: – доктор технических наук,  
профессор Фираго Б.И.,  
– кандидат технических наук,  
доцент Черномашенцев В.Г.

Оппонирующая организация: Белорусский металлургический  
завод

Защита состоится “22” апреля 1998 года в 15<sup>00</sup> часов на заседании совета по защите диссертаций К 02.13.01 в Гомельском политехническом институте им. П.О. Сухого по адресу:

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48 , корп. 1, ауд. 516,  
Гомельский политехнический институт им. П.О. Сухого.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Гомельского политехнического института им. П.О. Сухого.

Автореферат разослан “   ”                      1998г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций

Г.И. Селиверстов

© Погуляев М.Н., 1998

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Согласно Перечня Государственных научно-технических программ и научно-технических проектов на период с 1996 до 2000 года одним из приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь является "Охрана окружающей среды, использование природных ресурсов", а в качестве одного из основных путей реализации этого направления указано "Расширение геологоразведочных работ по развитию минерально-сырьевой базы страны". В связи с этим требуется активизация работ по поиску и разведки рудных месторождений, сырья для производства минеральных удобрений и строительных материалов, увеличению найденных запасов нефти и газа. Это заставляет усиленно искать пути повышения эффективности одного из наиболее перспективных методов геологоразведки, использующего вибро-сейсмическое просвечивание подземной среды с помощью электрогидравлических вибраторов (ЭГВ).

Существующие в настоящее время ЭГВ, используемые при зондировании Земли, не отвечают требованиям современной сейсморазведки в основном из-за низкого верхнего предела излучаемых частот – 150 Гц. Расширение диапазона частот, воспроизводимых сейсмоисточником, позволяет за счет получения дополнительной информации о физических параметрах исследуемой среды, увеличить разрешающую способность метода, что в конечном итоге снижает затраты на поиск и разведку месторождений полезных ископаемых. Требуется высокочастотные вибраторы и в технике проведения испытаний изделий на вибропрочность и вибростойкость, а также при определении резонансных частот различных конструкций.

Задача создания высокочастотных вибрационных сейсмоисточников может быть успешно решена только при условии существенного увеличения быстродействия электромеханического преобразователя (ЭМП), преобразующего электрический сигнал управляющего электронного блока в перемещение золотника первого каскада гидроусилителя. Это обусловлено тем, что для обеспечения устойчивой работы ЭГВ необходимо, чтобы собственная частота ЭМП почти втрое превышала требуемую верхнюю частоту сейсмоисточника.

Таким образом, разработка и исследование высокочастотных ЭМП для ЭГВ является актуальной задачей, решение которой усложняется тем, что в автономных электрогидровибраторах передвижных сейсморазведочных комплексов жестко ограничивается энергопотребление преобразователя по полной мощности. Как показывает анализ литературы, в настоящее время вопросы теории, расчета и проектирования быстродейст-

вующих ЭМП для гидроприводов разработаны недостаточно полно. В большинстве опубликованных работ, в основном, рассматриваются электромагнитные ЭМП постоянного тока или подробно исследуются преобразователи только электродинамического типа. До сих пор отсутствуют четкие рекомендации по выбору критериев оценки быстродействия ЭМП, позволяющих проводить их сравнительный анализ, нигде не рассматривается возможность применения электромашинных преобразователей в качестве вибровозбудителей для гидравлических усилителей. Вышеперечисленные аргументы говорят о необходимости проведения исследований, основное содержание которых сформулировано в цели и задачах настоящей работы.

Цель и задачи исследования. Цель диссертационной работы заключается в разработке основ теории, схемных реализаций, методов анализа и синтеза электромеханических преобразователей, ориентированных на применение в автономных высокочастотных ЭГВ.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи :

1. Создана система критериев оценки быстродействия преобразователей, работающих в составе автономных ЭГВ.
2. Проведен обзор технических характеристик известных типов ЭМП и дан их сравнительный анализ в соответствии с разработанной системой критериальных оценок.
3. Построена уточненная математическая модель обобщенного преобразователя, на основе которой разработаны методики анализа и синтеза быстродействующих ЭМП ограниченной полной мощности.
4. Разработаны программные средства, реализующие созданные методики и ориентированные на автоматизацию проектирования высокочастотных преобразователей, оптимальных по собственной частоте.
5. Определены пути усовершенствования конструкций серийных ЭМП электромашинного типа.
6. Найдены новые схемные реализации ЭМП электромагнитного и электромашинного типов с повышенным быстродействием.
7. Проведены экспериментальные исследования макетных образцов ЭМП различных типов

Научная новизна полученных результатов:

1. Предложены новые критериальные оценки быстродействия ЭМП гидравлических вибраторов с автономным электропитанием.
2. Впервые сформулированы направления решения и решена задача синтеза ЭМП оптимального по быстродействию в условиях ограниченной полной мощности источника управления.

3. Построена уточненная математическая модель обобщенного ЭМП.
4. Получены общие соотношения связи критериальных оценок быстродействия с массо-габаритными и энергетическими показателями преобразователя.
5. Разработаны новые принципы построения и найдены их схемные решения для реализации быстродействующих ЭМП электромагнитного и электромашинного типов.

Практическая значимость полученных результатов:

1. Разработаны новые инженерные методики и их программное обеспечение для ПЭВМ, позволяющие оптимально проектировать электромагнитные быстродействующие ЭМП для ЭГВ с учетом в комплексе: насыщения магнитной цепи, вихревых токов и ограниченность источника по полной мощности. Указанные методики и рекомендации по их применению переданы на использование НПО "Сейсмотехника" г. Гомеля.

Обобщенная математическая модель и оригинальные конструктивные разработки электромагнитных ЭМП используется при чтении специальных дисциплин учебного плана студентов специальности Т.11.02.01 - Автоматизированный электропривод.

2. Найдены конструктивные решения для четырех новых быстродействующих ЭМП электромагнитного типа.

3. Установлены соотношения для массо-габаритных параметров подвижных частей ЭМП, позволяющих оптимизировать его конструкцию применительно к использованию в высокочастотных ЭГВ.

4. Определены направления и найден ряд технических решений для усовершенствования конструкций серийных ЭМП электромашинного типа (электродвигателей постоянного тока с дисковым и полыми якорями, асинхронных электродвигателей с полым ротором, синхронных электродвигателей с катящимся ротором) для работы в режиме высокочастотных колебаний золотника гидроусилителя.

Экономическая значимость полученных результатов: Предложенные схемные реализации, методики проектирования и их программное обеспечение для ПЭВМ позволяют синтезировать оптимальные конструкции быстродействующих ЭМП, необходимых для создания высокочастотных электрогидравлических разведочных комплексов с повышенной разрешающей способностью. Потребность в таких комплексах остро ощущается при проведении разведочных работ на нефть, газ, минеральное сырье и др. как в Республике Беларусь, так и в странах СНГ. Их применение значительно ускоряет и удешевляет проведение поисковых работ.

Эти аргументы позволяют рассматривать новые схемные реализации быстродействующих ЭМП, методики их оптимального проектирования и

программное обеспечение для ПЭВМ как коммерческий продукт.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту: Автором защищаются:

1. Критерии оценки быстродействия ЭМП ограниченной мощности.
2. Уточненная математическая модель обобщенного ЭМП.
3. Методики анализа, синтеза и программы, реализующие их на ПЭВМ, для ЭМП электромагнитного типа оптимальных по максимуму собственной частоты при ограниченной потребляемой полной мощности.
4. Принципы и схемные решения быстродействующих маломощных ЭМП электромагнитного и электромашинного типов.

Личный вклад соискателя. Приведенные в настоящей работе результаты и материалы получены в основном при личном участии автора. Анализ результатов проведен под руководством научного руководителя.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на:

- всесоюзной научно-технической конференции "Динамические режимы работы электрических машин", г. Каунас, 1988;
- всесоюзной научно-технической конференции "Динамические режимы работы электрических машин и электроприводов", г. Бишкек, 1991;
- научно-практическом семинаре по электромеханике, г. Екатеринбург, 1991;
- третьей Дальневосточной научно-практической конференции "Совершенствование электрооборудования и средств автоматизации технологических процессов промышленных предприятий, г. Комсомольск-на-Амуре, 1992;
- научно-технических конференциях Гомельского политехнического института 1990-1996 г. г.;
- республиканских научно-технических конференциях "Автоматизированный электропривод промышленных установок", г. Минск, 1994, 1995;
- межрегиональном научно-техническом семинаре "Автоматизация и прогрессивные технологии", г. Новоуральск, 1996 г.;
- международной научно-технической конференции "Современные проблемы машиноведения", г. Гомель, 1996 г.

Опубликованность результатов. По результатам выполненных исследований в научно-технических изданиях, сборниках и тезисах конференций опубликовано 16 печатных работ, получено 3 авторских свидетельства на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов и приложений. Общий объем работы со-

ставляет 183 страниц, в том числе 34 рисунка на 28 страницах, 22 таблицы на 16 страницах, три приложения на 22 страницах и список используемых источников из 106 наименований на 8 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены принципы построения электромеханических преобразователей электрогидравлических вибраторов и приведены технические характеристики более 50 отечественных и зарубежных ЭПМ различных типов ( магнитоэлектрических, электромагнитных, электродинамических, индукционных, пьезоэлектрических и др. ), которые могут использоваться для работы в составе автономных ЭГВ .

ЭМП служит для преобразования электрического сигнала электронного блока управления в колебательное движение золотника управляющего каскада гидроусилителя.

Максимальная рабочая частота существующих виброисточников типа СВ и СВП не превышает 150 Гц, что не всегда отвечает нуждам современной сейсморазведки. Увеличение этой частоты требует повышения быстродействия электромеханического преобразователя, входящего в состав данных виброисточников.

Определены численные значения динамических , силовых и электрических параметров ЭМП, позволяющие повысить верхний предел рабочей частоты гидравлического вибратора вдвое, без увеличения полной электрической мощности автономного источника электропитания . Основные из них таковы:

- полная потребляемая мощность не более 42 ВА;
- амплитуда линейных колебаний якоря в рабочем диапазоне частот не менее 0.1 мм;
- резонансная частота колебаний нагруженного преобразователя не менее 750 Гц .

Для оценки быстродействия преобразователей ЭГВ предложена система критериев , содержащая , кроме общеизвестных показателей – собственного ускорения  $\varepsilon_0$ , относительного электромагнитного момента  $M_{0s}$  , электрической постоянной времени  $\tau$  и новый критерий – собственную частоту колебаний нагруженного ЭМП  $f_{рез}$ , определяющую динамические свойства всей электрогидравлической системы .

С помощью предложенной системы критериев по требуемым численным значениям проведен сравнительный анализ быстродействия отобранных в начале главы преобразователей различного типа.

Выявлено, что существующие ЭМП не отвечают в полной мере требованиям, предъявляемым к преобразователям, предназначенным для работы

в составе автономных высокочастотных ЭГВ. Наиболее перспективными для использования в таких ЭГВ оказались преобразователи электромагнитного типа, обладающие не только наилучшими динамическими, частотными и массо-габаритными характеристиками, но и отличающиеся удобством конструктивного сочленения с входными элементами гидроусилителей. Просматривается также возможность применения отдельных серийных электромашинных ЭМП в качестве быстродействующих при соответствующей доработке их конструкции.

Указано на необходимость учета при разработке методик расчета и проектирования высокочастотных ЭМП ограниченности источника электропитания автономного ЭГВ по полной мощности и влияния на характеристики преобразователя электрической упругости, ЭДС движения, действие вихревых токов, насыщения и других факторов.

С учетом вышесказанного были сформулированы цели и задачи проводимых исследований.

Во второй главе изложены вопросы теории и оптимального синтеза высокочастотных электромеханических преобразователей колебательного движения с ограниченным энергопотреблением.

Математическая модель (ММ) обобщенного преобразователя представлена системой уравнений в матричной форме

$$\left\{ \begin{array}{l} M_e \mathbf{I} = 0, \\ N_e (\mathbf{E} - \mathbf{U}_R - \frac{d\mathbf{\Psi}}{dt}) = 0, \\ M_m \mathbf{\Phi} = 0, \\ N_m (\mathbf{F} - \mathbf{U}_m) = 0, \\ \frac{dW_{эм}}{d\chi} - q_n = 0, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $\mathbf{I}$ ,  $\mathbf{U}_R$ ,  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{\Psi}$ ,  $\mathbf{\Phi}$ ,  $\mathbf{U}_m$ ,  $\mathbf{F}$  – векторы токов, электрических напряжений на активных сопротивлении, ЭДС источников электроэнергии, потокосцеплений, магнитных потоков, магнитных напряжений и МДС;  $M_e$ ,  $N_e$ ,  $M_m$ ,  $N_m$  – топологические матрицы соединений электрических (e) и магнитных (m) ветвей в узле M и контуре N;

$W_{эм}$  – энергия электромагнитного поля;

$\chi$ ,  $q_n$  – обобщенная координата перемещения подвижного элемента и нагрузочное усилие на нем.

Модель (1) позволяет получить конкретные математические описания ЭМП различных типов (электромагнитных, электродинамических, электромашинных и др.).



В частности, с её помощью была построена ММ базового электромагнитного преобразователя с поляризацией, применяемого в автономных ЭГВ сейсмокомплексов СВ и СВП (рис. 1а).

$$\left\{ \begin{array}{l} e = i \cdot R + \frac{d\psi}{dt}, \\ \Phi_1 R_1 - \Phi_3 R_3 = i W, \\ \Phi_4 R_4 - \Phi_2 R_2 = i W, \\ \Phi = \Phi_1 - \Phi_2, \\ \Phi_1 + \Phi_3 = \Phi_2 + \Phi_4 = 2 \Phi_{\text{п}}, \\ \frac{dW_{\text{эм}}}{d\alpha} = J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + b \frac{d\alpha}{dt} + C \alpha, \\ e \leq E_{\text{м.ист}}, \quad i \leq I_{\text{м.ист}}. \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $e$  – ЭДС источника электропитания;

$i, \psi$  – ток преобразователя и полное потокосцепление обмотки управления;

$R_1, \dots, R_4$  – магнитные сопротивления воздушных зазоров плеч моста магнитопровода;

$R = R_{\text{м}} + R_{\text{ст}} + R_{\text{ист}}$  – суммарное активное сопротивление источника, обмотки управления и эквивалентного потерям в стали;

$\Phi, \Phi_1, \dots, \Phi_4$  – магнитные потоки в якоре и полюсах (воздушных зазор);

$\Phi_{\text{п}}$  – магнитный поток одного постоянного магнита;

$W$  – суммарное число витков обмотки управления;

$\alpha, J, b, C$  – угол поворота якоря, момент инерции, коэффициенты демпфирования и упругости нагрузки и якоря;

$E_{\text{м.ист}}, I_{\text{м.ист}}$  – максимально допустимые значения ЭДС и тока на выходе источника питания.

Полученная математическая модель мостового ЭМП, в отличие от известных, позволяет учесть ограниченность источника по полной мощности на уровне  $E_{\text{м.ист}} \cdot I_{\text{м.ист}}$ , потери на гистерезис и вихревые токи через  $R_{\text{ст}}$  и влияние ЭДС движения через  $\psi$ .

Преобразование модели и вывод расчетных соотношений, необходимых для создания методик анализа и синтеза ЭМП, выполнены операторным методом и методом гармонического баланса, с последующей проверкой и анализом полученных уравнений на ЭВМ. При аналитическом исследовании статических и динамических свойств преобразователя использованы выражения для АЧХ и ФЧХ по основным и промежуточным переменным (перемещению якоря, потребляемому току, электромагнитному моменту, магнитной индукции в якоре и др.)

Для проведения синтеза ЭМП, оптимального по быстродействию при заданной полной мощности автономного источника, разработано математическое обеспечение, основу которого составляют уравнения целевой функции и ограничений.

В качестве целевой функции принято уравнение, связывающее основной критерий быстродействия – резонансную частоту с массогабаритными параметрами преобразователя.

$$f_{рез} = \frac{1}{2\pi} \left\{ 3 \cdot \pi \cdot g \cdot (1 + k_{гдв}) \cdot d_{тор}^4 \left\langle 16 \cdot h \cdot [ 12 \cdot m_{зол} \cdot n_{тор} \cdot h \cdot d_{тор} + \right. \right. \\ + 2 \cdot \gamma_{як} \cdot a_{тор} \cdot (3 \cdot n_{тор}^2 + k_1^2) \cdot h \cdot d_{тор}^4 + 12 \cdot \gamma_{як} \cdot a_{тор} \cdot n_{тор} \cdot h^2 \cdot d_{тор}^3 + \\ + 3 \cdot m_{зол} \cdot n_{тор}^2 \cdot d_{тор}^2 + 8 \cdot \gamma_{як} \cdot a_{тор} \cdot h^3 \cdot d_{тор}^2 + 12 \cdot m_{зол} \cdot h^2 + \\ \left. \left. + \gamma_{як} \cdot a_{тор} \cdot n_{тор} \cdot (n_{тор}^2 + k_1^2) \cdot d_{тор}^5 \right] \right\rangle^{-1} \right\}^{0.5}, \quad (3)$$

где  $\gamma_{як}$  – удельная масса материала якоря;

$q$  – модуль упругости материала торсиона;

$h, d_{тор}$  – размер окна катушки управления и диаметр торсиона;

$k_1, k_{гдв}$  – коэффициенты запаса по креплению торсиона в якоря и гидродинамической жёсткости;

$a_{тор}, n_{тор}$  – расчётные коэффициенты, зависящие от отношения поперечных сечений полюса и якоря, коэффициента запаса  $k_1$  и относительной ширины якоря  $a_0 = a_{як} / b_{як}$ .

Уравнения ограничений получены на основе требований, предъявляемых к ЭМП со стороны автономного ЭГВ, и условием ненасыщения якоря рабочим магнитным потоком

$$\begin{cases} I_m \leq I_{м.ист}, \\ X_m \geq X_{м.р}, \\ B_m \leq k_s \cdot B_s, \end{cases} \quad (4)$$

где  $X_{м.р}$  – требуемое по техническому заданию величина амплитуды линейных колебаний якоря;

$I_m, X_m, B_m$  – расчетные значения амплитуды потребляемого тока, линейных колебаний якоря и магнитной индукции в якоря;

$B_s, k_s$  – индукция насыщения материала якоря и коэффициент запаса по насыщению.

Решение задачи синтеза оптимального по быстродействию ЭМП за-

ключается в определении значений конструктивных параметров  $d_{\text{тор}}$ ,  $h$  и  $a_0$ , при которых значение резонансной частоты максимально и одновременно выполнены условия ограничений (6).

Поскольку и целевая функция (5) и ограничения (6) являются нелинейными, взаимосвязанными и неявными функциями трёх независимых переменных, то для решения задачи оптимизации использован метод упорядоченного перебора, не требующий сложных математических преобразований оптимизируемой функции и ограничений. Такой подход позволил разработать достаточно простую и эффективную методику и алгоритм расчета параметров ЭМП с максимальным быстродействием для заданных значений напряжения  $U_{\text{м.ист}}$  и тока  $I_{\text{м.ист}}$  источника электропитания и амплитуды линейных якоря  $X_{\text{мр}}$ .

Оптимизация конструктивных параметров базового преобразователя, выполненная с использованием созданной методики, позволила повысить его собственную частоту почти в 1,6 раза.

В третьей главе с помощью разработанной программы оптимального синтеза проанализировано влияние параметров ЭМП и источника электропитания на собственную частоту. Выявлено, что её росту способствует не только увеличение магнитной индукции в зазорах от постоянных магнитов, повышение мощности источника электроэнергии и снижение величины воздушного зазора, но и оптимальные геометрия и материалоёмкость конструкции.

Это позволило определить основные пути повышения быстродействия мостовых ЭМП и способы их практической реализации (использование высококоэрцитивных постоянных магнитов, изменение геометрии поверхностей, образующих воздушный зазор, применение катающегося якоря и т.д.).

Так, например, выполнение поверхности полюсов в виде сектора кругового цилиндра равносильно уменьшению воздушного зазора, что приводит к увеличению электромагнитного момента, развиваемого преобразователем, и улучшению его динамических характеристик.

Применение в конструкции базового ЭМП полюсов с цилиндрической поверхностью позволяет повысить его собственную частоту почти на 11%. Данная конструкция преобразователя, разработанная при непосредственном участии автора, защищена авторским свидетельством №1690112.

Более значительному росту быстродействия электромагнитного мостового ЭМП способствует замена плоского якоря на катающийся. В этом случае, как показывают прогнозные расчеты, его резонансная частота в 2 раза превысит требуемую для создания высокочастотного ЭГВ.

Принципиальными недостатками базового ЭМП, сдерживающими по-

лучение высокого быстродействия, являются, – движение якоря вдоль воздушного зазора и прохождение магнитного потока от рабочих обмоток вдоль якоря. Первое не позволяет выполнить воздушный зазор малым по величине, второе – уменьшить момент и инерции якоря.

Предложены новые перспективные конструкции электромагнитных преобразователей типов “микросин” ( рис. 1б) и “сэндвич” ( рис. 1в), у которых указанные недостатки устранены за счет перехода к движению якоря поперёк воздушного и использования поперечного магнитного поля. В результате этого удалось существенно повысить быстродействие преобразователей. Так, значение собственного ускорения “микросина” в 1,7 раза, а “сэндвича” в 3 раза выше, чем базового ЭМП.

Разработаны оригинальные конструкции электромагнитных преобразователей с дисковым якорем ( типа “клапан”), принцип действия которых базируется на идее прерывания рабочего магнитного потока, создаваемого постоянными магнитами ( рис. 1г) или обмотками возбуждения постоянного тока, управляемым (насыщаемым) ферромагнитным экраном. При этом мощность, потребляемая от источника электропитания на управление экраном относительно невелика, а электромагнитное усилие, развиваемое преобразователем, может достигать весьма больших величин, так как оно почти полностью определяется магнитной энергией постоянного магнита. Кроме того, момент инерции дискового якоря существенно ниже, чем обычного якоря. Вследствие этого, быстродействие преобразователя с управляемым магнитным экраном оказывается в несколько раз выше, чем быстродействие мостового ЭМП традиционного исполнения.

Для всех представленных в главе преобразователей получены общие уравнения связи их силовых характеристик с энергетическими и массогабаритными параметрами, на основе которых построены методики проектирования.

Оценена возможность применения в быстродействующих автономных ЭГВ электромашинных преобразователей ( электродвигателей постоянного и переменного тока ). В результате анализа статических и динамических параметров удалось отобрать шесть электродвигателей (ДП-95, АДП-1362, ДБМ-120-1.6, СДКР, МИГ - ПР, ТМ-510), способных составить конкуренцию электромагнитным преобразователям.

Хотя в комплексе по техническим характеристикам выбранные электродвигатели пока уступают базовому ЭМП, но по некоторым показателям ( собственному ускорению – ДП-95, МИГ- ПР , относительному и пусковому электромагнитным моментам – СДКР, ДБМ-120-1,6 ) они на несколько порядков превосходят его.

Определены направления, по которым необходимо модернизировать

конструкции серийных электродвигателей, с тем чтобы они полностью удовлетворяли техническим требованиям ЭМП с собственной частотой 750 Гц. Даны конкретные рекомендации по проведению модернизации рассмотренных электромашинных преобразователей.

В четвертой главе содержится описание экспериментальной установки для проведения исследований ЭМП и представлены результаты опытных испытаний макетных образцов преобразователей различных типов. В ходе выполнения экспериментальных исследований получены амплитудно-частотные и статические характеристики электромагнитных ЭМП и преобразователей на базе серийных электро-двигателей постоянного (ДП-95-90) и переменного токов (АДП-563А, АДП-1262А), определены значения их резонансных частот. Подтверждена работоспособность макетных образцов преобразователей новых конструктивных исполнений, – с управляемым ферромагнитным экраном (типа “клапан”) и поперечным магнитным полем с дисковым якорем, движущимся поперёк воздушного зазора (типа “сэндвич”), практически проверено влияние конструктивных параметров на быстродействие ЭМП

Сравнение расчетной и экспериментальной амплитудно-частотных характеристик базового электромагнитного ЭМП (рис.2) показывает, что в зоне рабочих частот (до  $0.4 \cdot f_{рез}$ ) различие в амплитудах колебаний якоря не превосходит 14 %.

Вне рабочей зоны максимальное расхождение характеристик наблюдается на частоте  $0.9 \cdot f_{рез}$  и не превышает 20 %. Действительное и вычисленное значение резонансной частоты преобразователя практически совпадают (отличие не более 5 %). Хорошая сходимость результатов, полученных аналитически и опытным путем, указывают на адекватность разработанной математической модели мостового электромагнитного ЭМП и построенных на её основе методик анализа и оптимального синтеза его параметров.

Оценить возможность использования серийных электромашинных преобразователей в качестве вибровозбудителей для автономных высокочастотных ЭГВ позволяют результаты экспериментальных исследований электродвигателей постоянного тока ДП-95-90-6 и асинхронных АДП-563А и АДП-1262А, колебательный режим работы который создавался способом разночастотного питания. При этом для улучшения энергетических характеристик асинхронных электродвигателей, работающих в режиме колебаний, использованы технические решения, защищенные авторскими свидетельствами №1631689 и №1623788.

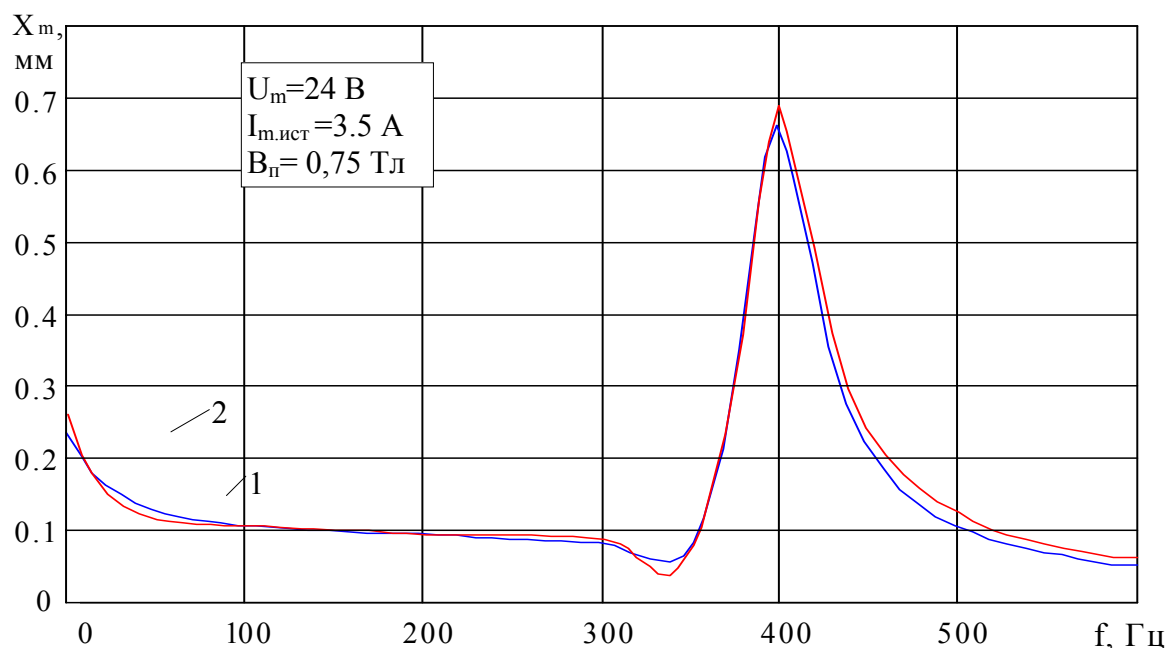


Рис.3. Амплитудно-частотные характеристики электромагнитного мостового ЭМП: 1 – экспериментальная; 2 – расчётная

Из анализа амплитудно-частотных характеристик рассматриваемых преобразователей, нагруженных жесткостью  $5 \cdot 10^5$  Н·м<sup>-1</sup> (такой же как у базового ЭМП) следует, что значение резонансной частоты двигателя ДП-95 равно 305 Гц, и 410 Гц и 450 Гц имеют соответственно двигатели АДП-563А и АДП-1262А, т.е. несколько выше, чем у электромагнитного мостового ЭМП. Однако в рабочем диапазоне частот амплитуда колебаний ротора асинхронных преобразователей оказывается в 2...5 раз ниже требуемой, а потребляемая мощность в 1,5... 2 раза превышает максимально допустимую мощность автономного источника электропитания. По этим причинам исследуемые электрические двигатели в стандартном, промышленном исполнении не могут быть использованы для работы в составе высокочастотных ЭГВ мобильных установок сейсмического зондирования земли. В данном случае необходимо в соответствии с рекомендациями, полученными в работе, провести модернизацию их конструкций, направленную на увеличение пускового электромагнитного момента и снижение полной потребляемой мощности.

Опытные испытания макетных образцов быстродействующих преобразователей, новых исполнений, типа “клапан” и “сэндвич”, показали их работоспособность и практически подтвердили правильность предложенных принципов повышения быстродействия, заложенных в основу их конструктивных схем. В частности, резонансная частота преобразователя с

управляемым ферромагнитным экранам и постоянными магнитами составила 479 Гц, а такого же преобразователя с обмотками возбуждения – 578 Гц, что соответственно на 27 % и 48 % выше собственной частоты базового ЭМП.

В тоже время было выявлено, что для нормального функционирования ЭМП типа “сэндвич” необходимо строго соблюдать технологию изготовления отдельных его элементов, а дисковый якорь преобразователя должен выполняться достаточно жестким. Это позволит уменьшить величину односторонних магнитных сил тяжения и избежать залипания якоря на поверхности полюса. Для увеличения электромагнитного момента, развиваемого таким преобразователем, его якорь следует выполнять из нескольких дисков, работающих параллельно на общий торсион.

### **ВЫВОДЫ**

В результате проведенных исследований успешно решена важная научно-техническая задача по созданию быстродействующих электромеханических преобразователей для автономных высокочастотных ЭГВ, разработке методики их анализа и оптимального синтеза. Это подтверждается полученными в работе конкретными результатами, позволяющими сделать следующие выводы:

1. Оценку быстродействия ЭМП, работающих в составе ЭГВ, следует производить с помощью созданной системы критериев, содержащей, кроме общеизвестных показателей — собственного ускорения, относительного электромагнитного момента, электромеханической постоянной времени, и новый критерий — резонансную частоту нагруженного преобразователя, который является основным, определяющим динамические характеристики всей электрогидравлической системы.

2. Для создания автономного гидровибратора с максимальной рабочей частотой 300 Гц требуется ЭМП, который должен иметь собственную частоту — не менее 750 Гц, полную потребляемую мощность — не более 42 ВА и обеспечивать во всем рабочем диапазоне частот амплитуду колебаний золотника управляющего каскада не ниже 0.1 мм.

3. Сравнительный анализ технических параметров более 50 современных отечественных и зарубежных ЭМП показал, что наиболее перспективными для использования в высокочастотных ЭГВ являются электромагнитные преобразователи, которые, хотя и не отвечают всем необходимым требованиям в комплексе, но в сравнении с другими имеют наилучшие динамические, частотные и весовые характеристики.

4. Определяющее влияние на технические характеристики ЭМП, работающего в составе высокочастотного автономного ЭГВ, оказывают ограниченность источника электропитания не только по активной, но и по пол-

ной мощности, увеличение потерь в стали от вихревых токов и на гистерезис, рост ЭДС движения и электромагнитной жесткости. Учет этих факторов необходимо осуществлять путем введения в математическую модель ЭМП уравнений связи и ограничений.

5. Задача синтеза ЭМП с максимальным быстродействием сводится к решению задачи поиска экстремума трехмерной целевой функции, связывающей собственную частоту преобразователя с конструктивными параметрами, при ограничениях, определяемых требованиями его нормального функционирования в составе автономного ЭГВ. Для решения этой задачи, имеющей нелинейный характер, сложную и неявную взаимосвязь конструктивных параметров, целевой функции и ограничений, предложено использовать метод упорядоченного перебора, который без сложных математических преобразований оптимизируемой функции и ограничений позволяет разработать удобную инженерную методику, алгоритм и программное обеспечение расчета основных конструктивных параметров ЭМП с максимальным быстродействием при заданных значениях амплитуды колебаний золотника, напряжения и тока источника электропитания. Проведенная с помощью созданной методики оптимизация конструкции электромагнитного мостового ЭМП позволила повысить его собственную частоту на 50%.

6. Усовершенствование базового ЭМП углового колебательного движения в направлении увеличения собственной частоты можно производить не только за счет применения высококоэрцитивных постоянных магнитов, но и путём изготовления полюсов с цилиндрической поверхностью и использования катающегося якоря.

7. Для создания новых типов электромагнитных ЭМП повышенного быстродействия наиболее целесообразно использовать конструкции с поперечным прохождением магнитного потока и дисковым якорем, движущимся поперек воздушного зазора. В этом случае собственная частота таких преобразователей может достигать значения 1кГц.

8. Серийные электродвигатели постоянного тока ТМ-510, ДП-95, ДБМ-120-1.6 и переменного тока АДП-1362, СДКР можно использовать для высокочастотного электромеханического преобразования если модернизировать их конструкции в направлении увеличения пускового электромагнитного момента (АДП-1362, ТМ-510), снижения потребляемой мощности (ДП-95, АДП-1362) и уменьшения момента инерции (ДБМ-120-1.6, СДКР)

9. Основные теоретические выводы и рекомендации подтверждены экспериментально. Хорошая сходимость расчетных и опытных данных свидетельствуют о том, что изложенные в работе основные теоретические положения адекватно отражают реально происходящие процессы.



Предложенные в работе технические решения защищены авторскими свидетельствами и реализованы при создании опытных образцов электро-механических преобразователей высокочастотных автономных электро-гидровибраторов.

## **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Погуляев М. Н. Колебательный режим работы асинхронного электродвигателя при питании его постоянным током и синусоидальными напряжениями // В сб. "Задачи динамики электрических машин". – Омск: Изд. ОМПИ, 1986. – С. 127-130.

2. Луковников В. И., Погуляев М. Н., Елисеев Г.А., Серeda В. П. Повышение быстродействия электромагнитных преобразователей углового движения // Изв. высш. учеб. заведений. Приборостроение. – 1995, №3–4. – С. 47-48.

3. Луковников В. И., Погуляев М. Н., Соленков В. В. Применение обобщенного комплексного метода расчета электрических цепей // Гомельск. политехн. инст. – Гомель, 1987. – 16с. – Деп. в ВИНТИ 25.10.87, № 670–эт87.

4. Луковников В. И., Погуляев М. Н., Серeda В. П. Асинхронный высокочастотный электропривод // В сб. "Задачи динамики электрических машин". – Омск: Изд. ОМПИ, 1988. – С. 78-83.

5. Луковников В. И., Погуляев М. Н., Грачев С. А., Тодарев В. В. Состояние и перспективы развития электромеханических преобразователей электрогидравлических систем // Гомельск. политехн. инст. – Гомель, 1989. – 32с. – Деп. в ВИНТИ 15.11.89, №850–эт89.

6. А. С. №1623788 СССР, МКИЗ В 06 В 1/04. Асинхронный электродвигатель колебательного движения / В. И. Луковников, М. Н. Погуляев, В. В. Тодарев. – №4467123/07; Заявлено 11.05.88; Оpubл. 30.01.91, Бюл. №4. – 2с.

7. А. С. №1631689 СССР, МКИЗ Н 02 Р 7/62. Способы управления колебательным электроприводом с асинхронным двигателем / В. И. Луковников, М. Н. Погуляев, В. В. Тодарев. – №4651139/07; Заявлено 13.02.89; Оpubл. 28.02.91, Бюл. №8. – 4с.

8. А. С. №1690112 СССР, МКИЗ Н 02 К 33/06. Электромагнитный преобразователь углового движения / В.И.Луковников, М. Н. Погуляев, В. В.Тодарев. – №4663053/07; Заявлено 15.03.89; Оpubл. 07.11.91, Бюл. №41. – 4с.

9. Грачев С. А., Погуляев М. Н., Тодарев В. В. Динамика колебательного режима несимметричного асинхронного электродвигателя // Динамиче-

ские режимы работы электрических машин и электроприводов: Тез. докл. конф. – Каунас: КПИ, 1988. – С.37.

10. Погуляев М. Н., Середа В. П. Динамика асинхронного электродвигателя в режиме развертки частоты колебательного движения // Динамические режимы работы электрических машин и электроприводов: Тез. докл. конф. – Каунас: КПИ, 1988. – С.97.

11. Луковников В. И., Погуляев М. Н. Быстродействующие электромеханические преобразователи электрогидравлических вибраторов // Динамические режимы электрических машин и электроприводов: Тез. докл. конф. – Бишкек: БПИ, 1991. – С. 45-46.

12. Луковников В. И., Погуляев М. Н., Елисеев Г. А. Проблемы и пути усовершенствования быстродействующих электромеханических преобразователей // Матер. науч.-практ. семинара по электромеханике. – Екатеринбург: ЕПИ, 1991. – С. 123-124.

13. Луковников В. И., Погуляев М. Н., Тодарев В. В. Математические модели обобщенного электродвигателя непосредственного привода // Тез. докл. конф. – Гомель: ГПИ, 1992. – С. 38.

14. Луковников В. И., Погуляев М. Н., Елисеев Г. А. Быстродействующий электромагнитный преобразователь углового движения // Совершенствование электрооборудования и средств автоматизации технологических процессов промышленных предприятий: Тез. докл. конф. – Комсомольск-на-Амуре: КнАПИ, 1992. – С. 25–26.

15. Погуляев М. Н. Электромеханический преобразователь с собственной частотой 1 кГц // Тез. докл. конф. – Гомель: ГПИ, 1994. – С. 43.

16. Погуляев М. Н. Электромеханический преобразователь с повышенной собственной частотой // Автоматизированный электропривод промышленных установок: Тез. докл. конф. – Минск: БГПА, 1994. – С. 13.

17. Луковников В. И., Погуляев М. Н. Математическая модель высокочастотного электромеханического вибропреобразователя // Состояние и перспективы развития науки и подготовки инженеров высокой квалификации: Матер. междунар. конф. Часть 3. – Минск: БГПА, 1995. – С. 180-181.

18. Погуляев М. Н. Оптимизация быстродействующих электромеханических преобразователей ограниченной мощности // Автоматизация и прогрессивные технологии: Матер. межрег. семинара-выставки. – Новоуральск: МИФИ-2, 1992. – С. 127.

19. Луковников В. И., Погуляев М. Н. Оптимизация электромеханических преобразователей электрогидравлических вибросистем // Современные проблемы машиноведения: Матер. междунар. конф. – Гомель: ГПИ, 1996. – С. 189-190.

## РЭЗІЮМЭ

Пагуляеў Міхаіл Нічыпаравіч

Высокачастотныя электрамеханічныя пераўтваральнікі  
для аўтаномных электрагідраўлічных вібратораў.

Электрамеханічны пераўтваральнік, матэматычная мадэль, электрагідраўлічны вібратар, аналіз, сінтэз, аптымізацыя, хуткадзейнасць, рэзанансная частата .

Аб'ектам даследавання з'яўляюцца электрамеханічныя пераўтваральнікі, працуючыя ў саставе высокачастотных аўтаномных электрагідраўлічных вібратораў .

Цэль працы заключаецца ў распрацоўцы асноў тэорыі, схемных рэалізацый, метадаў аналізу і сінтэзу хуткадзейных электрамеханічных пераўтваральнікаў, арыентаваных на прымяненне ў аўтаномных электрагідраўлічных вібраторах.

Навуковая і практычная значнасць вынікаў складаецца ў тым, што:

- прапанаваны новыя крытэрыі ацэнкі хуткадзейнасці ЭМП гідраўлічных вібратораў з аўтаномным электрасілкаваннем;

- упершыню сфармуляваны напрамкі вырашэння і выраша-на задача сінтэзу ЭМП аптымальнага па хуткадзейнасці ў умовах абмежаванай поўнай магутнасці крыніцы электраэнергіі;

- пабудавана ўдакладненая матэматычная мадэль абагуль-неннага ЭМП;

- пабудаваны метадыка і праграмае забеспячэнне для аналізу і аптымальнага сінтэзу на ПЭВМ пераўтваральнікаў, маючых максімальную рэзанансную частату пры зададзенай поўнай магутнасці крыніцы электраэнергіі;

- распрацаваны новыя прынцыпы пабудовы і знойдзены іх схемныя вырашэнні для рэалізацыі хуткадзеячых ЭМП электра-магнітнага і электрамашыннага тыпаў.

Вынікі даследаванняў могуць быць выкарыстаны ў НПА «Сейсма-тэхніка» г. Гомеля пры праектаванні электрамеханічных пераўтваральнікаў для гідравібратораў крыніц сейсмічнага зандзіравання зямлі.

Галіна выкарыстоўвання – арганізацыі і прадпрыемства, якія займаюцца праектаваннем ЭМП для хуткадзеячых электрагідраўлічных вібратораў рознага прызначэння.

## РЕЗЮМЕ

Погуляев Михаил Никифорович

### Высокочастотные электромеханические преобразователи для автономных электрогидравлических вибраторов

Электромеханический преобразователь, математическая модель, электрогидравлический вибратор, анализ, синтез, оптимизация, быстродействие, резонансная частота.

Объектом исследования являются электромеханические преобразователи, работающие в составе высокочастотных автономных электрогидравлических вибраторов.

Цель работы заключается в разработке основ теории, схемных реализаций, методов анализа и синтеза быстродействующих электромеханических преобразователей, ориентированных на применение в автономных электрогидравлических вибраторах.

Научная и практическая значимость полученных результатов состоит в том, что:

- предложены новые критерии оценки быстродействия ЭМП электрогидравлических вибраторов с автономным электропитанием;
- впервые сформулированы направления решения и решена задача синтеза ЭМП оптимального по быстродействию в условиях ограниченной полной мощности источника электропитания;
- построена уточненная математическая модель обобщенного ЭМП;
- созданы методика и программное обеспечение для анализа и оптимального синтеза на ПЭВМ преобразователей, имеющих максимальную резонансную частоту при заданной полной мощности источника управления;
- разработаны новые принципы построения и найдены их схемные решения для реализации быстродействующих ЭМП электромагнитного и электромашинного типов.

Результаты исследования могут быть использованы в НПО «Сейсмотехника» г. Гомеля при проектировании электромеханических преобразователей для гидровибраторов источников сейсмического зондирования земли.

Область применения – организации и предприятия, занимающиеся проектированием ЭМП для быстродействующих электрогидравлических вибраторов различного назначения.

## SUMMARY

Pogulaev Mihail Nikiforovich

### High-frequency electromechanic converters for autonomous electrohydraulic vibrators

Electromechanic converter, mathematical model, electrohydraulic vibrator, analysis, syntheses, optimization, speed, resonance frequency.

The object of study are electromechanic converters, working in the composition of radio-frequency autonomous electrohydraulic vibrators.

The purpose of work is concluded in the development of base of theory, circuit realization, methods of analysis and syntheses of high-speed electromechanic converters, oriented on using in autonomous electrohydraulic vibrators.

The scientific and practical value of tinning results consists in that that:

- offered new standard of judgement of speed EMC hydraulic vibrators with autonomous electrofeeding;
- for the first time worded directions of deciding and speech a problem of syntheses EMC optimum on the speed in conditions limited packed powers a source of management;
- built elaborated mathematical model generalised EMC;
- created strategy and software for the analysis and optimum syntheses on PC converters, having maximum resonance frequency under given packed powers a source of management;
- designed new principles of building and found their circuital deciding for realization high-speed EMC electromagnetic and electromachine types.

The results of studies can be used in Scientifically Production Association «Seismotekhnika» c. Gomel. When designing the electromechanic converters for source hydrovibrators of seismic flexing a land.

Fields of use – the organizations and enterprises, concerning with designing EMC for high-speed electrohydraulic different purpose vibrators.